

基于 YanMeng 模型模拟台风的初步探索

李 涛, 雷 鹰*, 徐志谦, 刘 朝

(厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 利用风场模型对台风进行数值模拟得到极值风速这一方法已被广泛应用. 首先详细介绍 YanMeng 风场模型物理模型及数值解法; 着重强调该模型中的两个随机参数: Holland 参数 B 、等效粗糙长度 z_0 , 讨论了它们对气压场及风速的影响程度, 并给出相应取值方法; 最后以 YanMeng 风场模型作为技术背景, 根据厦门气象局提供的实测台风数据对台风 DAN 进行数值模拟, 得到梯度风场以及台风影响下厦门地区表面风速, 以证明 YanMeng 风场模型的可行性.

关键词: YanMeng 风场模型; Holland 参数; 等效粗糙长度; 模拟风场

中图分类号: TU 973.32

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2009)06-0840-04

随着沿海地区大跨、高耸以及高层结构的不断涌现, 这类结构对风的作用十分敏感, 研究台风对工程区域风环境的影响特点并合理预测台风极值风速就显得尤为重要. 目前, 应用台风资料和台风风场模型, 采用数值方法模拟台风风速进行危险性分析是国际上普遍采用的方法. 国内外很多学者也对不同风场模型进行探索和改进^[1-8].

1 YanMeng 风场模型

YanMeng 风场模型采用 Holland^[9] 气压场模型

$$p = p_c + \Delta p \exp[-(r_m/r)^B] \quad (1)$$

式中, 中心气压差 Δp = 外围气压 p_c - 中心气压 p_c ; r_m : 台风最大风速半径; r : 某点到台风中心距离; B : Holland 参数.

利用边界层摩擦力修正的压力梯度平衡方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f k \times v + F \quad (2)$$

式中, ρ 空气密度; k : 拟合系数; f : Coriolis 参数; F : 边界层摩擦力; 将空气运动速度 v 可以看作梯度风速 v_g 和由地表摩擦力引起的风速 v_f 的矢量和, 即 $v = v_g + v_f$; 由于径向气压梯度在台风边界层内随高度变化很小, 而边界层以上的摩擦影响可以忽略, 式(2)可展成两项:

$$\frac{\partial v_g}{\partial t} + v_g \cdot \nabla v_g = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f k \times v_g \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_f}{\partial t} + v_f \cdot \nabla v_f + v_f \cdot \nabla v_g + v_g \cdot \nabla v_f = -f k \times v_f + F \quad (4)$$

结合假设 $\frac{\partial v_g}{\partial t} = -c \cdot \nabla v_g$ 和 $\frac{\partial v_f}{\partial t} = 0$, 式(3), (4) 可简化为

$$(v_g - c) \cdot \nabla v_g = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f k \times v_g \quad (5)$$

$$v_f \cdot \nabla v_f + v_f \cdot \nabla v_g + v_g \cdot \nabla v_f = -f k \times v_f + F \quad (6)$$

利用柱坐标系可以将式(5)所表达的平衡方程按切向和径向分解为

$$(v_{rg} - c_r) \frac{\partial v_{rg}}{\partial r} + \frac{v_{\theta g} - c_{\theta}}{r} \frac{\partial v_{rg}}{\partial \theta} - \frac{v_{\theta g}^2}{r} + \frac{v_{\theta g} c_{\theta}}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + f v_{\theta g} \quad (7)$$

$$(v_{rg} - c_r) \frac{\partial v_{\theta g}}{\partial r} + \frac{v_{\theta g} - c_{\theta}}{r} \frac{\partial v_{\theta g}}{\partial \theta} + \frac{v_{\theta g} v_{rg}}{r} - \frac{v_{rg} c_{\theta}}{r} = -f v_{rg} \quad (8)$$

式中, $v_{\theta g}$ 和 v_{rg} 分别表示梯度风速水平面内切向和径向分量值; c 为台风整体移动速度, $c_r = c \cos(\theta - \beta)$, $c_{\theta} = -c \sin(\theta - \beta)$. 由于 $v_g \ll v_{\theta g}$, 则 $v_{\theta g}$ 可以近似表示为

$$v_{\theta g} = \frac{1}{2}(c_{\theta} - f r) + \left[\left(\frac{c_{\theta} - f r}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \right]^{1/2} \quad (9)$$

而 v_{rg} 可近似取值为 0.

由于摩擦风径向分量 v_{rf} 、 $v_{\theta f}$ 均小于 $v_{\theta g}$, 式(6)可线性分解为

收稿日期: 2009-03-04

基金项目: 建设部专项项目课题: 超高层建筑风振实测点及技术创新研究, 厦门市建设系统科技技术项目(2008-1)资助

* 通讯作者: ylei@xmu.edu.cn

$$-\left(2\frac{v_{\theta}}{r}+f\right)v_{\theta}=k_m\frac{\partial^2 v_f}{\partial z^2} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial v_{\theta}}{\partial r}+\frac{v_{\theta}}{r}+f\right)v_{rf}=k_m\frac{\partial^2 v_f}{\partial z^2} \quad (11)$$

引入

$$\xi=\left(\frac{\partial v_{\theta}}{\partial r}+\frac{v_{\theta}}{r}+f\right)^{1/2}\backslash(2v_{\theta}/r+f)^{1/2}$$

与

$$\lambda=\left(\frac{\partial v_{\theta}}{\partial r}+\frac{v_{\theta}}{r}+f\right)^{1/4}\left(2\frac{v_{\theta}}{r}+f\right)^{1/4}\backslash(2k_m)^{1/2}$$

得

$$v_{\theta}=e^{-\lambda\xi}[D_1\cos(\lambda\xi')+D_2\sin(\lambda\xi')] \quad (12)$$

$$v_{rf}=-\xi e^{-\lambda\xi}[D_2\cos(\lambda\xi')-D_1\sin(\lambda\xi')] \quad (13)$$

其中

$$D_1=-\frac{\lambda(X+1)v_{\theta}-\lambda v_{rg}/\xi}{1+(X+1)^2};$$

$$D_2=\frac{\lambda v_{\theta}+\lambda(X+1)v_{rg}/\xi}{1+(X+1)^2};$$

$$X=\frac{C_d}{k_m\lambda}|v_s|=\frac{C_d}{k_m\lambda}\sqrt{v_{\theta}^2+v_{rs}^2};$$

$C_d=\kappa^2/\{\ln[(z_0+h-d)/z_0]\}^2$, 通常情况下以 $z=h+z_{10}$ 或 $z'=0$ 为台风模型的计算起始点, $\kappa=0.4$; $h=Az_0^{0.86}$, $A=11.4$, z_{10} 为平均粗糙单元以上 10 m 高度, $z_{10}=10+d$; d 为零平面位移, 取 $d=0.75h$; z_0 为等效粗糙长度, v_s 为表面风速, $v_{\theta s}$ 、 v_{rs} 分别表示表面风速的切向和径向分量, 用迭代计算选用梯度风速 $v_{\theta g}$ 、 v_{rg} 作为迭代循环待求项 $v_{\theta s}$ 、 v_{rs} 的初值。

2 两个重要参数 B 、 z_0

2.1 Holland 参数 B

B 是 Holland 气压场模型的一个重要参数, 针对 Holland 根据实际观测得出参数 B 的最佳取值范围为

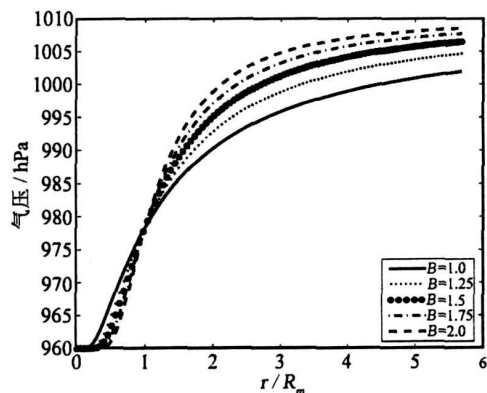


图 1 B 对气压 p 的影响

Fig. 1 Distribution of pressure p affected by B

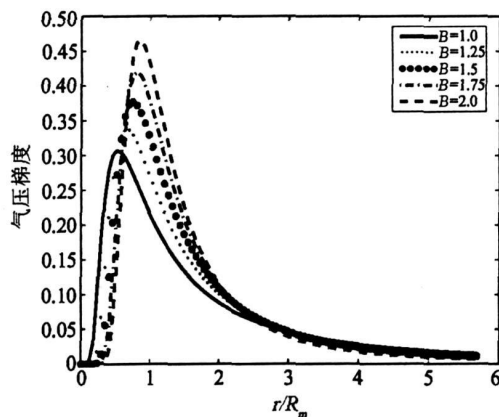


图 2 B 对气压梯度的影响

Fig. 2 Pressure gradient affected by B

1.05~2.0 之间^[1], 分别取 $B=1.0, 1.25, 1.5, 1.75$ 和 2.0 得到的气压分布、气压梯度分布情况如图 1, 2 所示。

可以看出, $r/R_m < 1$ 范围内 B 对 p 的影响不十分明显, $r/R_m > 1$ 时随着 B 的增大, 气压梯度变化加剧, 而气压场的变化势必引起风速变化。图 3 为 B 取上述值时, 风速与最大风速比值 v/v_m 与 r/R_m 的关系曲线, 可直观看出 B 对风速分布的影响。

对于参数 B 取值, 目前还没有成熟的理论方法, 彭翔^[10] 提到两种估计方法: 1) 在气象领域的台风预报和数值模拟工作上, 得到参数 B 和中心压差 Δp 之间的经验公式: $B = a \ln K_p^2 (\Delta p)^{2\beta-1} / 1.06^2$, 其中, a 为单位换算系数, $a = 7.72 \times 10^{-4}$; K_p 、 β 为回归系数, 具体取值应根据实测得到。2) 根据参数和台风中心最低气压 Δp 的经验关系 $B = 1.5 + (980 - p_c) / 120$, 该模型认为参数和台风中心最低气压 Δp 是线性关系。总之, 参数 B 是影响风场模型的一个重要因素, 参数 B 的最优取值范围应进一步缩小, 便于了解不同台风之间以及同一台风不同时刻的风场变化。亦可由式(1)得到

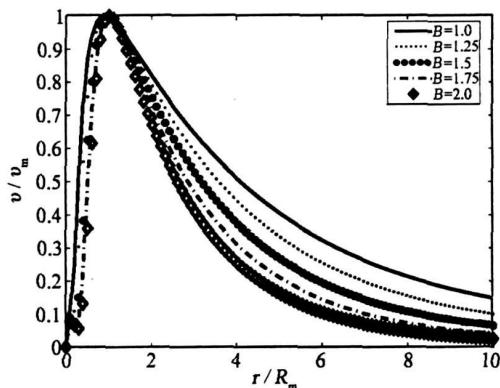


图 3 B 对风速的影响

Fig. 3 Distribution of velocity affected by B

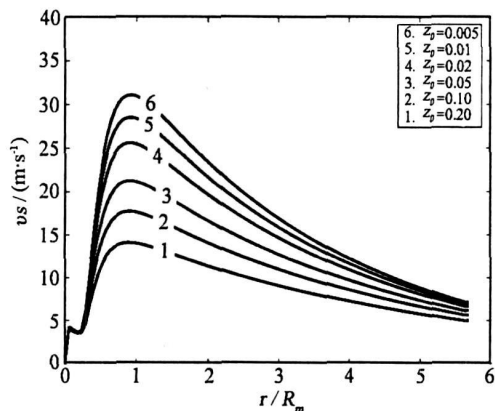


图4 z_0 对风速的影响

Fig. 4 Distribution of velocity affected by z_0

气压梯度表达式

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\Delta p \cdot B}{r} \left(\frac{R_m}{r} \right)^B \exp \left[- \left(\frac{R_m}{r} \right)^B \right] \quad (14)$$

梯度风速公式表达式

$$v_{\theta g} = \frac{1}{2} (c_0 - fr) + \left[\left(\frac{c_0 - fr}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \right]^{1/2},$$

$$c_0 = -c \sin(\theta - \beta) \quad (15)$$

根据分析,最大梯度风速应出现在与台风移动方向一致的方向,此时 $c_0 = 0$. 所以最大梯度风速为: $v_{\theta \max} =$

$\sqrt{\left(\frac{f \cdot r}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} - \frac{1}{2} f \cdot r$. 将气压梯度公式代入即得: $v_{\max}^2 = \frac{B \cdot \Delta p}{e \cdot \rho}$, Δp 与 v_{\max}^2 呈正比例关系. 通过对台

风最大梯度风速与中心气压差的统计资料,得到 B 的估计值.

2.2 等效粗糙长度 z_0

YanMeng 风场模型引入“等效粗糙长度”概念模拟边界层风速剖面,若 z_0 分别取 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.10, 0.20 六个不同的值,则分别得到表面风速随着半径变化曲线(图4). 随着 z_0 变化,极值风速变化显著. 一般认为, z_0 与场地粗糙程度有关,不同的场地类别对应不同的 z_0 . 有学者^[10] 建议, I 类场地: z_0 取 0.005~0.02, II 类场地: z_0 取 0.05~0.20. 为能更好地模拟不同地区真实风场,应综合 B 作用下选择模拟风速与实际风速误差最小时的 z_0 值.

3 风场数值模拟

台风 DAN 于 1999 年 10 月 3 日 20 时在太平洋海面生成,后经菲律宾群岛北部进入南海,6~7 日开始北折,在福建省龙海—厦门之间登陆,最大风速为 40 m/s. 厦门测站(位置: 24°30' N, 118°00' E) 出现最大风速达到 20 m/s. 根据厦门气象局提供的台风资料实测数据,利用 YanMeng 模型模拟得到 DAN 台风风场结果如图 5.

然后根据迭代计算模拟厦门地区表面风速分布与实测结果进行比较如图 6 所示.

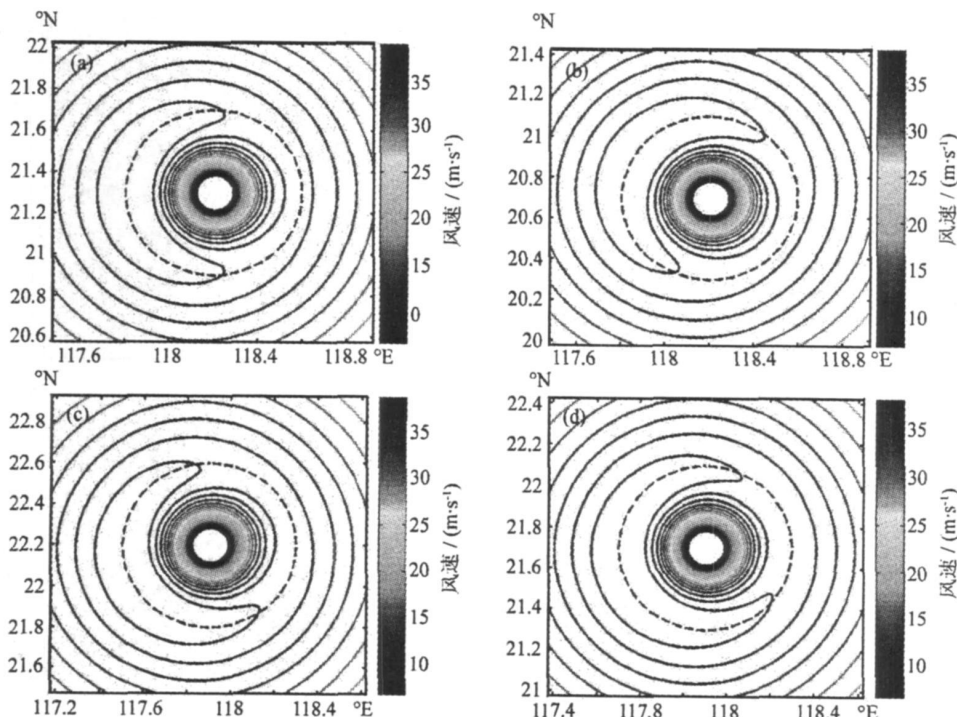


图5 DAN 台风风场模拟结果

(a) 10月 07 日 20 时; (b) 10月 08 日 02 时; (c) 10月 08 日 08 时; (d) 10月 08 日 14 时

Fig. 5 Typhoon DAN wind field simulation results

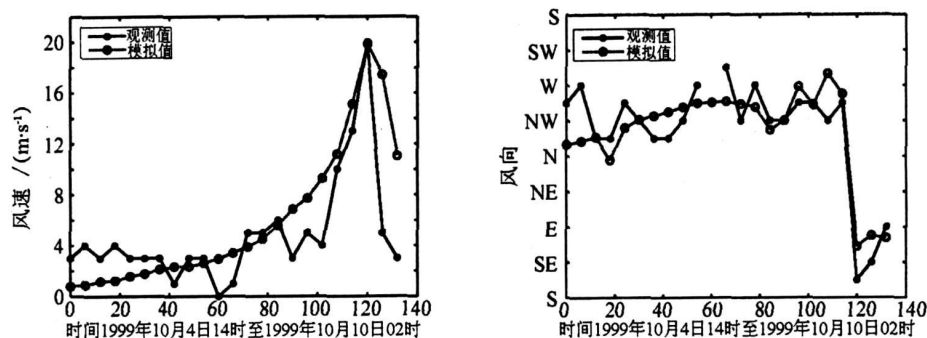


图6 台风 DAN 厦门测站模拟风速风向结果

Fig.6 Wind speed and direction of Xiamen observation by Typhoon DAN

由图可知,在台风影响下厦门地区在10月09日14时以前风速在3~6 m/s波动,风向以东偏北方向为主,在10月09日14时风速达到最大值为20 m/s,风向转为西偏南方向,之后风速下降,风向不变。

4 结论与展望

1) 本文引入 YanMeng 风场模型,并利用该模型进行实际台风数值模拟,结果表明 YanMeng 模型可以较好地模拟厦门地区台风风场和台风引起的地面风速、风向分布。证明了利用 YanMeng 风场模型进行实际风场模拟的可行性。

2) YanMeng 风场模型中包含两个重要参数 B 和 z_0 对模拟结果影响很大,模拟结果的优劣取决于参数选择。对于这两个参数取值细化需进一步研究。

参考文献:

- [1] Russell L R, Schueller G I. Probabilistic models for texas gulf coast hurricane occurrence [J]. Journal of Petroleum Tech, 1974(3): 279- 288.
- [2] Bats M E, Russell L R, Simiu E. Hurricane wind speeds in the united states [J]. Journal of Structure Division, 1980,

106(ST10): 2003- 2005.

- [3] Georgiou P N, Davenport A G, Vickery B J. Design wind speed in region dominated by tropical cyclones [J]. Journal of Wind Engineering and Aerodynamics, 1983, 13: 139 - 152.
- [4] Shapiro L J. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane [J]. J Atmos Sci, 1983(40): 1984- 1998.
- [5] 李茜. 台风关键参数统计分析与 Shapiro 风场模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- [6] Vickery P J, Skerlj P F, Twisdale L A. Simulation of hurricane risk in the US using empirical track model [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(10): 1222- 1237.
- [7] Yan Meng, Masahiro Matsui, Kazuki Hibi. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56: 291- 310.
- [8] 赵林, 葛耀君, 项海帆. 台风风场随机参数敏感性分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 727- 731.
- [9] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. Mon Weather Rev, 1980, 108 (8): 1212- 1218.
- [10] 彭翔. 近海台风工程数值模拟及极值风速预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

Initiative Research on Typhoon Simulation by YanMeng Wind Field Model

LI Tao, LEI Ying*, XU Zhir qian, LIU Chao

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Many kinds of analytical models have been developed for simulating the typhoon wind field to access possible extreme wind velocity. YanMeng wind field model and the solution scheme are introduced to make some basic researches on wind field in this study. Two stochastic parameters, Holland parameter B and equivalent roughness length z_0 , are presented to discuss their sensitivity indices about pressure field and wind velocity. Finally the results of Typhoon DAN simulated by YanMeng model are illuminated through comparison with the observation data. The calculated results of simulated wind field are so agreeable with the observed data to certify the applicability of YanMeng model in the simulation of wind field induced by typhoon.

Key words: YanMeng wind field model; Holland parameter; equivalent roughness length; wind field simulation